不同草带空间分布对坡面细沟侵蚀调控机制

贾莲莲[1]，刘雅丽[1]，朱冰冰[2]，张 霞[3]

(1.黄河水利委员会黄河上中游管理局,西安 710021;2.陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710061; 3.省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室(西安理工大学),西安 710048)

摘要: 为了研究植被对坡面细沟侵蚀调控机制,采用模拟降雨试验,结合激光扫描方法,分析了不同草带分布沟坡面细沟侵蚀发生、发展过程。结果表明:草带位于梁峁坡下部 60%,植被调控侵蚀效果最优,相比裸坡减少径流量 7.4%,减少产沙量 62.9%,相比蓄水减沙功效而言更具直接拦沙的功能。植被通过调控细沟侵蚀的发生、发展、发育过程实现了对土壤侵蚀的调控作用,尤其是对沟坡侵蚀产沙的调控作用;而且这种对侵蚀的调控作用不仅改变了细沟侵蚀发生的位置,而且改变了径流和侵蚀过程以及侵蚀方式;细沟侵蚀已经向面蚀(片蚀)转化,大幅度降低侵蚀程度。研究结果揭示了植被可以通过影响侵蚀方式来调控侵蚀输沙过程,有助于加深坡面植被对细沟侵蚀发育形态作用机理的理解。

关键词: 草带空间分布; 坡面; 细沟侵蚀; 调控机制

中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2021)01-0145-04

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.021

Regulation Mechanisms of Different Spatial Distributions of Grass Belts on Slope Rill Erosion

JIA Lianlian[1], LIU Yali[1], ZHU Bingbing[2], ZHANG Xia[3]

(1.*Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Xi'an* 710021; 2.*School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an* 710061; 3.*State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048)

Abstract: In order to study the regulation mechanisms of vegetation on rill erosion in a slope, the occurrence and development process of rill erosion with different grass spatial distributions were studied by artificial rainfall simulator and three-dimensional scanning technology. The results showed that the grass strip positioned at about 60% of the hillslope length from the top could fully exhibit its regulation effect on erosion by reducing the runoff and sediment by 7.4% and 62.9% respectively compared with bare slope. The grass strip showed direct sediment interception more than its water storage function. The regulation of vegetation on soil erosion was realized by regulating the rill formation, development and density in a slope, especially at the gully-slope. Moreover, vegetation not only changed the occurrence position of rill erosion, but also changed the erosion process and erosion pattern, the degree of erosion was greatly reduced with rill erosion transforming into sheet erosion. The information indicated that vegetation can regulate the erosion sedimentation processes by affecting the erosion pattern, and the results can be useful for better understanding the effect of vegetation configuration on rill erosion development morphology in a slope.

Keywords: grass belt spatial distribution; slope; rill erosion; regulation mechanism

细沟侵蚀是重要的土壤侵蚀过程,在世界范围内许多地区的坡耕地和农场内导致大量的土壤流失。坡面细沟的分叉、合并、连通加剧了侵蚀,最终形成了复杂的细沟形态,从而显著影响坡面侵蚀输沙过程和特征[1-3]。许多学者专注于细沟形态变化在侵蚀过程的研究,然而由于具体的试验条件、土壤类型、降雨条件和空间尺度的原因,导致结果存在一些差异,因此,细沟侵蚀仍然是当前的研究热点之一[3-6]。

流域水沙关系同细沟的发生、发展、发育过程的研究始终为土壤侵蚀的研究热点[1-2]。部分学者通过野外观测和室内人工模拟降雨试验开展了细沟形态动态发育过程研究工作,选取系列指标(细沟宽度、深

收稿日期:2020-07-03
资助项目:国家自然科学基金项目(52009103);陕西省创新能力支撑计划项目(2019TD-040);陕西省自然科学基础研究计划项目(2015JQ4099);中国地质调查局项目(DD20190504)
第一作者:贾莲莲(1983—),女,甘肃庆阳人,高级工程师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:jlnh83@163.com

度、沟长、细沟密度、细沟宽深比等)来描述细沟形态变化特征[3-5]以及细沟侵蚀发育过程[1-6],用以反映实际侵蚀产沙过程中下垫面侵蚀与沉积情况,并选取这些指标开展了降雨强度与坡度对细沟形态的综合影响[2],取得了有益的研究成果。尽管国内外学者对细沟侵蚀发育过程进行了大量的试验测试分析,但受实际客观因素和技术手段的限制,导致有效可靠的数据匮乏,尽管有许多学者对细沟侵蚀发育过程以及内在机理开展分析[6-7],但对不同植被空间分布对坡面的细沟侵蚀发育过程和调控机制的研究还有所欠缺。因此,开展黄土高原地区坡面植被分布对细沟侵蚀调控机理的研究具有重要的科学意义和现实意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

研究根据黄土丘陵沟壑区坡面地貌形态,同时结合室内试验条件,构建了坡面物理模型(图 1)。试验模型梁峁坡长 8 m,坡度 12°,沟坡长 5 m,坡度 25°[8]。

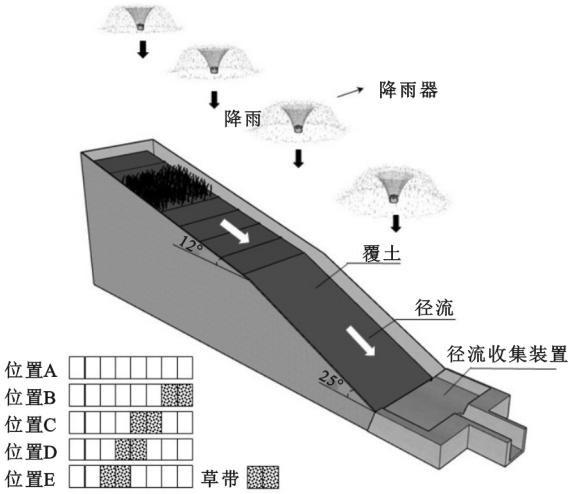

图 1 坡面概化模型

试验用土壤为西安郊区丘陵台塬地貌黄土,经过筛分处理。颗粒尺寸为 0.002～0.05 mm 的颗粒占 91.39%,0.05～0.1 mm 的颗粒占 6.21%,为粉质土。试验槽底部铺设 20 cm 厚的天然砂。对钢槽内黄土进行夯实,使其容重在 1 300 kg/m^3 左右,通过喷水预湿的方法使土壤含水量在 20%左右。然后在沙层上放置 20 cm 厚的土壤,并为草带布设预留 10 cm 空间,使草带与裸坡紧密连接以防止降雨时滑动。

选用野生马尼拉草为试验草带,草根系长 20 cm,长势较好。试验开始 15 天前,草带在试验钢槽内生长,按照模型的尺寸,草带的尺寸设定为 2 m×1 m。

1.2 试验方法

本试验采用间歇性降雨试验,意在研究连续降雨条件下,间歇性降雨对坡面细沟侵蚀发育过程影响及植被对细沟侵蚀调控机制。本试验的模拟降雨采用向上式降雨装置,滤纸法[9]测量的雨滴直径与自然降雨雨滴尺寸接近。试验中梁峁坡、沟坡分别布设 4 个喷头,每个喷头的降雨面积达到 3～4 m^2。试验采用喷头尺寸和水压力来准确控制雨强、雨量和降雨均匀程度[10]。试验中选用黄土区的中雨雨强(90 mm/h)[10-11]、间隔 24 h 的间歇性降雨,每个草带位置开展 2 场试验。为减少试验误差,每场试验重复 2 次,重复结果表明,产沙和径流均值未发生显著差异,次降雨产沙量误差可以控制在 10%以内。根据产流达到稳定状态的时间,确定径流历时为 30 min。试验进行时,水沙样品每 1 min 采样 1 次,测量径流量;泥沙经过 24 h 静置后分离,在 105 ℃下烘干 8 h 后称重。

针对较为干旱环境和条件下的黄土高原地区植物实际生长情况[12],试验选择覆盖度为 25%,共设计 5 种植被位置(图 1):位置 A(裸坡)、位置 B(梁峁坡下部)、位置 C(梁峁坡中下部)、位置 D(梁峁坡中上部)、位置 E(梁峁坡上部)。

1.3 地表微地貌测量

使用扫描仪测量降雨前、后坡面三维地形。测量精度为 1 mm,进而建立试验中坡面表面 DEM[13]。每种位置下共扫描 3 个 DEM 数据(1 m×13 m)。

将初始降雨前 DEM 记为“Rain 0”,第 2 次降雨后的 DEM 标为“Rain 2”。第 2 次降雨后的产沙量为 Rain 1—Rain 2。下垫面的草带会影响 DEM 测试数据,需要去除植被的噪点数据。对获取的 DEM 点云数据进行插值处理,插值间距为 10 mm×10 mm。产沙总体积计算公式为:

$$V_E = \sum H_i S \tag{1}$$

式中:V_E 为降雨后侵蚀产沙体积(L);H_i 为 2 次降雨 DEM 高程变化(mm);S 为面积(10 mm×10 mm)。

2 结果与分析

2.1 坡面径流侵蚀产沙对植被空间分布的响应

从 2 次降雨后的不同位置的产沙量和径流量均值(表 1)可以看出,2 次降雨中,草带位于梁峁坡(位置 C)时的产沙和径流均处于最低水平,植被调控侵蚀效果最佳。在不同草带位置条件下,均出现第 2 次降雨径流量均值较第 1 次有所增加,产沙量均值有所降低的趋势,其径流增加和产沙减少幅度分别为 5%～37%和 42%～82%。表明随着降雨量的持续增加,径流量增加幅度较小,但产沙量减小幅度很大,究其原因是由于经过第 1 次的降雨侵蚀,细沟已经初步形成,且土壤表面已经形成结皮;加之第 1 次降雨前,土壤表面有浮土存在,导致第 1 次降雨后产沙量较第 2 次降雨后产沙量有所增大。同时也可以看出,不同位置的草带分布,其径流与产沙差异显著,其植被调控侵蚀过程差异显著,一些草带位置情况下减蚀效果较好,但也有部分情况下(位置 D,E)减蚀效果较差,甚至劣于裸坡。

表 1　不同植被空间分布下 2 次降雨下产沙量和径流量均值

指标	降雨场次	A	B	C	D	E
产沙量均值/	第 1 次降雨	2.35±0.38b	2.59±0.34b	1.21±0.12b	6.41±0.88a	6.42±0.97a
(kg·min^{-1})	第 2 次降雨	1.36±0.10a	0.65±0.06b	0.52±0.08b	1.36±0.19a	1.17±0.21a
径流量均值/	第 1 次降雨	8.62±0.22b	9.04±0.34b	8.41±0.31b	12.40±0.65a	9.88±0.42b
(L·min^{-1})	第 2 次降雨	11.24±0.36b	12.40±0.24ab	9.00±0.25c	13.07±0.39a	11.28±0.62b

注:表中数据为平均值±标准误差;同一行(列)不同小写字母表示不同位置(降雨场次)间差异显著($p<0.05$)。

2.2　坡面地貌变化对植被空间分布的响应

本研究通过降雨前后坡面地表微地貌形态变化过程,表征降雨过程中侵蚀发育形态,侵蚀部位动态变化过程,侵蚀强度的差异。

由图 2 可知,第 1 次降雨开始阶段,基本以击溅侵蚀为主;随着降雨历时的增加、雨量增大,坡面开始产生径流,发生面蚀;径流逐渐汇集,细沟侵蚀逐渐产生、加剧[2];第 1 次降雨后,各个植被空间分布,细沟网络均已经发展。裸坡时,细沟长度较大,从坡脚一直延伸到梁峁坡中下部,细沟发育情况比较严重。当草带位于梁峁坡下部(位置 B)和梁峁坡中下部(位置 C)时,细沟侵蚀长度最小,仅从坡脚延伸到草带下边缘,侵蚀发育程度较轻。当草带位于梁峁坡中上部(位置 D)和梁峁坡上部(位置 E)时,细沟侵蚀亦是从坡脚延伸到草带下边缘,但由于此时草带位置偏上,细沟侵蚀长度最大,且细沟发育程度最为剧烈,且已连片。草带位于位置 A、B 和 C 时,第 2 次降雨后,细沟发育较缓,变化幅度不大;但在位置 D,E 时,细沟发育十分强烈,细沟宽度和深度急剧增加。

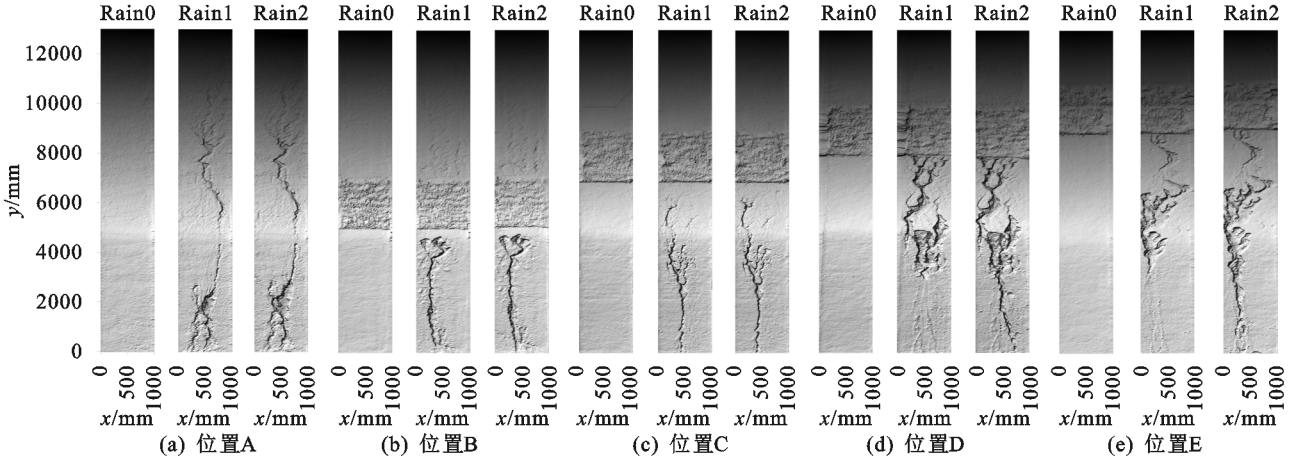

图 2　降雨前后细沟形态发育过程

2.3　坡面细沟侵蚀对植被空间分布的响应

通过对第 2 次降雨前后细沟发育形态的计算和测量[14],提取出最终状态下细沟发育和侵蚀状态的各项侵蚀指标。由表 2 可知,各个植被分布状态下,细沟发育的各项指标总体变化趋势一致,但强度变化差异很大。纵观所有植被空间分布状态,草带位于梁峁坡偏上的位置(D,E),细沟侵蚀发育程度十分剧烈,远强于其他 3 种分布状态,细沟侵蚀占总侵蚀量的 75.9%和 78.5%,细沟对侵蚀产沙贡献达到峰值。表明草带位于梁峁坡偏上的位置,细沟侵蚀已经成为最主要的侵蚀方式(图 2),主要分布于梁峁坡上部至沟坡的大部分区域。细沟侵蚀十分发育,最大细沟宽度和深度均达到峰值,土壤侵蚀十分强烈。

当裸坡时候(位置 A),细沟侵蚀占总侵蚀量的 55.23%,虽然细沟侵蚀是此时主要的侵蚀方式,但其侵蚀程度弱于细沟侵蚀占据主导作用的情况(位置 D,E),细沟侵蚀主要发育于沟坡区域(图 2a)。而草带位于梁峁坡偏下的位置(B 和 C),细沟侵蚀占总侵蚀量的不到 45%,说明此时由于植被调控侵蚀的作用增强,侵蚀程度大大减弱,侵蚀方式已经由细沟侵蚀逐渐转变为击溅侵蚀和片蚀,并逐渐占据主导作用,而细沟侵蚀仅仅发育于沟坡部分区域内(图 2b 和图 2c),最细细沟侵蚀宽度和深度已明显减少。

表 2　植被空间分布下第 2 次降雨后的侵蚀指标

草带位置	总侵蚀体积/L	细沟侵蚀体积/L	细沟侵蚀比率/%	最大细沟侵蚀宽度/mm	最大细沟侵蚀深度/mm
A	123.7	68.3	55.2	218	173
B	103.4	46.2	44.8	153	105
C	68.7	21.1	30.6	91	110
D	240.2	182.3	75.9	536	186
E	259.9	203.9	78.5	558	198

3　讨论

综合分析梁峁坡面径流侵蚀产沙对植被空间分

布的响应关系(表 1)可以看出,当草带位于梁峁坡下部 60%(位置 C),植被调控侵蚀的作用最优,表现出较好的水保效果;相比裸坡而言可以减少径流量 7.4%,减少产沙量 62.9%,植被的布设对泥沙拦截的作用优于对径流拦蓄的作用,相比蓄水减沙功效而言更加具备直接拦沙的功能,这与笔者前期的研究[15-16]结论一致。结合细沟侵蚀发育情况对植被空间分布的响应关系(图 2 和表 2)不难发现,草带位于梁峁坡下部 60%(位置 C)具有试验范围内最好的减沙效果,这得益于该位置的草带能够充分抑制细沟侵蚀的发育,使得侵蚀指标均有大幅降低(表 2),甚至改变了侵蚀方式,细沟侵蚀已经向面蚀(片蚀)转化,大幅度降低了侵蚀程度;由于细沟侵蚀不再占据主导作用,面蚀的侵蚀能力和强度有限,导致侵蚀指标会进一步减少[13]。通过合理位置布设植被的双重耦合作用下,显著抑制了细沟侵蚀的发育程度,控制了侵蚀产沙的动力机制,减少坡面流速,取得较好的减蚀效果[17-19]。

当草带位于梁峁坡中上部和上部时,其径流量和产沙量均达到试验范围内峰值,已经超越裸坡,侵蚀程度最为剧烈(表 1),这显然与植被能够显著减少侵蚀的常识明显相悖。这与 Jin 等[20]提出的在强降雨、低植被盖度下产生更为严重侵蚀的结论相似。综合分析不同植被空间分布下 2 次降雨下产沙量和径流量均值(表 1)和降雨前后细沟形态发育过程和侵蚀指标(图 2 和表 2)可以看出,位置 D,E 下的草带布设位置较为偏上,草带下边缘的裸坡同坡脚直接相连,这段区域为径流加速、水动力恢复、物质侵蚀均都提供的较大的空间。因此,此区域内的细沟侵蚀较为发育,细沟侵蚀从坡脚延伸到梁峁坡草带下边缘,细沟侵蚀长度最大,且细沟发育程度最为剧烈,且已连片,径流在该区域内更为集中且流速较裸坡有所增加,细沟深度和宽度均达到峰值。而且,径流被草带过滤后,径流含沙量减少,径流携运泥沙能力相对增强,产生了较裸坡更大的径流剥蚀率[21-23]。如上所述,由于草带位置 D,E 情况下,细沟侵蚀较为发育,使得径流路径连通较早,水文连通性形提前形成,大部分径流均由发育的细沟流出坡面,导致入渗量减少,径流量增加;尤其在第 2 次降雨后,地表结皮发育,径流量与其他位置的径流量差距更为明显。这样急剧增加了径流对下垫面的冲刷,导致侵蚀程度急剧增加,侵蚀产沙量达到试验范围内峰值。因此在径流量急剧增加、细沟发育和动力恢复(加速)空间的多重复合作用下,侵蚀程度最为剧烈,侵蚀产沙量(表 1)和各项侵蚀指标达到峰值(表 2),且超越了裸坡时的情况。

总而言之,植被通过调控细沟侵蚀的发生、发展、发育过程实现了对土壤侵蚀的调控作用,尤其是对沟坡侵蚀产生的调控作用;这种对侵蚀的调控作用不仅改变了细沟侵蚀发生的位置,而且改变了径流和侵蚀过程和侵蚀方式。

4 结 论

(1)当草带位于梁峁坡下部 60%,植被调控侵蚀的作用最优,表现出较好的水保效果;相比裸坡而言减少径流量 7.4%,减少产沙量 62.9%。植被的布设对泥沙拦截的作用优于对径流拦蓄的作用,相比蓄水减沙功效而言更加具备直接拦沙的功能。

(2)植被位于梁峁坡中下部,能够充分抑制细沟侵蚀的发育,降低各项侵蚀指标,甚至改变了侵蚀方式,细沟侵蚀已经向面蚀(片蚀)转化,大幅度降低了侵蚀程度。植被位于梁峁坡中上部和上部,草带下边缘的裸坡与坡脚直接相连,为径流加速、水动力恢复、物质侵蚀均都提供的较大空间,细沟侵蚀在此区域内发育程度十分剧烈,且已连片;加之草带过滤含沙量减少,径流携运泥沙能力相对增强。更为重要的是,此时径流路径连通较早,入渗量减少,径流量增加,急剧增加了径流对下垫面的冲刷,导致侵蚀程度最为剧烈。

(3)植被通过调控细沟侵蚀的发生、发展、发育过程实现了对土壤侵蚀的调控作用,尤其是对沟坡侵蚀产沙的调控作用;这种对侵蚀的调控作用不仅改变了细沟侵蚀发生的位置,而且改变了径流和侵蚀过程以及侵蚀方式。

参考文献:

[1] Kimaro D N, Poesen J, Msanya B M, et al. Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interrill and rill erosion [J].Catena,2008,75:38-44.

[2] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology [J]. Geomorphology,2015,231:93-201.

[3] 郑粉莉,唐克丽,周佩华.坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J]土壤学报,1989,26(2):109-116.

[4] 刘和平,王秀颖,刘宝元.人工模拟降雨下细沟与细沟间流速的沿程分布[J].地理研究,2011,30(9):1660-1668.

[5] 蔡强国,朱远达,王石英.几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J].水科学进展,2004,15(1):12-18.

[6] 吴淑芳,刘政鸿,霍云云,等.黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J].土壤学报,2015,52(1):48-56.

[7] 和继军,宫辉力,李小娟,等.细沟形成对坡面产流产沙过程的影响[J].水科学进展,2014,25(1):90-97.

(下转第 153 页)

外人的问题,实现建设者、使用者、管护者三者统一,确保治理成果持续发挥效益。

致谢:参加调查的人员包括林祚顶,乔殿新,丛佩娟,刘宝元,党维勤,焦菊英,王飞,王春梅,韩剑桥,冯伟,李斌斌,王国振,庞国伟,龙永清,王雷,戈文艳,周子渊,郭静,杨勤科,符素华,陆绍娟,从辰宇,刘元昊,马春玲,谢梦霞,刘欣,朱梦阳,郭紫甜,朱浩楠,陈羽璇,仲原,苏建华等。

参考文献:

[1] Westra S, Fowler, H J, Evans J P, et al. Future changes to the intensity and frequency of short - duration extreme rainfall [J].Reviews of Geophysics, 2014, 52:522-555.

[2] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(Ⅰ):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):3-8,50.

[3] 胡宜昌,董文杰,何勇.21 世纪初极端天气气候事件研究进展[J].地球科学进展,2007,22(10):1066-1075.

[4] Li Z Y, Fang H Y. Impacts of climate change on water erosion: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 163:94-117.

[5] 徐建华,金双彦,高亚军,等.水保措施对“7·26”暴雨洪水减水减沙的作用[J].人民黄河,2017,39(12):22-26.

[6] 董炳江,张欧阳,许全喜,等.2018 年汛期三峡水库上游暴雨产沙特性研究[J].人民长江,2019,50(12):21-25.

[7] 韩丹丹,穆兴民,高鹏,等.极端降水条件下大理河流域水沙特征对比分析[J].中国水土保持科学,2019,17(6):61-68.

[8] 李占斌,符素华,解建仓,等.窟野河流域暴雨侵蚀产沙研究[J].水利学报,1998(增刊 1):19-24.

[9] 刘宝元,段淑怀,符素华,等.北京市“7·21”特大暴雨水土保持措施效益评价[J].北京水务,2012(5):8-13.

[10] 王颢霖,焦菊英,唐柄哲,等.陕北子洲“7·26”暴雨后坡耕地细沟侵蚀及其影响因素分析[J].农业工程学报,2019,35(11):122-130.

(上接第 148 页)

[8] Pan C Z, Shangguan Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall [J]. Catena,2007,70:350-355.

[9] Best A C. The size distribution of raindrops [J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1950, 76(327):16-36.

[10] Zhang X, Yu G Q, Li Z B, et al. Experimental study on slope runoff erosion and sediment under different vegetation types [J]. Water Resources Management, 2014,28(9):2415-2433.

[11] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China [J].Catena,2016,137:1-11.

[12] Rey F. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2004,29(9):1161-1169.

[13] Darboux F, Davy P H, Gascuel-Odoux C, et al. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments [J].Catena,2001, 46:125-139..

[14] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J].农业工程学报,2014,30(11):110-117.

[15] Zhang X, Yu G Q, Li Z B, et al. Experimental study on slope runoff erosion and sediment under different vegetation types [J]. Water Resources Management, 2014,28(9):2415-2433.

[16] 张霞.黄土区地貌与植被格局的侵蚀动力过程试验研究[D].西安:西安理工大学,2018.

[17] Lei T W, Nearing M A. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model [J]. Water Resources Research,1998,34(11): 3157-3168.

[18] Li M, Yao W Y, Chen J N, et al. Impact of different grass coverages on the sediment yield process in the slope-gully system [J].Acta Geographica Sinica,2005, 60(5):725-732.

[19] Zhang H Y, Wang Y L. Landscape ecological optimization in land resource exploitation: Overview of the methods [J]. Earth Science Frontiers,2000,7(8):112-120.

[20] Jin K, Cornelis W M, Gabriels D, et al. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses [J].Catena,2009,78:81-86.

[21] Vermang J, Norton L D, Huang C, et al. Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall[J].Soil Science Society of America Journal,2015,79(3):903-916.

[22] Nadal-Romero E, Lasanta T, García-Ruiz J M. Runoff and sediment yield from land under various uses in a Mediterranean mountain area: Long-term results from an experimental station [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2013,38(4):346-355.

[23] Nearing M A, Simanton R, Norton D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999,24(8):677-686.